Scientific Journal of Electronical & Cyber Defence
Vol. 10, No. 3, Autumn 2022, Serial No. 39

Clustering and Routing in Wireless Sensor Networks Using Multi-Objective Cuckoo Search and Game Theory

S. Z. Majidian, M. M. Shirmohammadi*

*Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

(Received: 07/09/2021, Accepted: 13/12/2021)

ABSTRACT

Selecting the appropriate cluster head nodes as well as determining the correct radius for the clusters are two key issues in ensuring the performance of cluster-based Wireless Sensor Networks (WSNs). In this paper, a routing and clustering algorithm for wireless sensor network is presented. The clustering algorithm presented in this research uses unequal clustering technique. This means that in the clustered structure of the network, the size of each cluster may differ from others. This structure reduces energy consumption in crowded areas by using clusters with smaller radius, and increase network throughput by using larger radius for clusters located in areas with low traffic. In the proposed method, the multi-objective cuckoo search algorithm is used to determine the optimal cluster nodes and also to determine the optimal radius for each cluster. After determining the clustered structure of the network, a routing algorithm based on game theory is used to determine the optimal paths for sending data to the base station. The performance of the proposed method in a simulated environment is evaluated and its efficiency is compared with previous algorithms. The simulation results show that by using the proposed method, in addition to reducing energy consumption, network traffic can be prevented and load distribution can be done more efficiently.

Keywords: Wireless Sensor Network, Clustering, Routing, Cuckoo Search, Game theory.

*Corresponding Author Email: Mmshirmohammadi@iauh.ac.ir

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

نشریه علمی "پدافند الکترونیکی و سایبری"
سال دهم، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۱، ص ۲۰- ۱۱

علمی – پژوهشی

خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم توسط جستجوی فاخته چندهدفه و نظریه بازی

سیده زهره مجیدیان[۱]، محمدمهدی شیرمحمدی[۲*]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، ۲- استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۶، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۲)

چکیده

انتخاب گره‌های سرخوشه مناسب و همچنین تعیین اندازه صحیح برای خوشه‌ها، دو مسئله اساسی در تضمین عملکرد شبکه‌های حسگر بی‌سیم مبتنی بر ساختار خوشه‌بندی می‌باشد. در این مقاله، یک الگوریتم مسیریابی و خوشه‌بندی در شبکه حسگر بی‌سیم ارائه شده است. الگوریتم خوشه‌بندی ارائه شده در این تحقیق از روش خوشه‌بندی نامتقارن استفاده می‌کند. بدین معنا که در ساختار خوشه‌بندی شبکه، اندازه هر خوشه ممکن است متفاوت از سایر خوشه‌ها باشد. این ساختار موجب می‌شود که با استفاده از خوشه‌هایی با شعاع کوچک‌تر بتوان مصرف انرژی در نواحی پرازدحام را کاهش داده و از طرفی با به‌کارگیری خوشه‌هایی با شعاع بزرگ‌تر برای نواحی با ترافیک پایین؛ توان عملیاتی شبکه را افزایش داد. در روش پیشنهادی از الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه به‌منظور تعیین گره‌های بهینه سرخوشه و همچنین تعیین شعاع بهینه برای هر خوشه استفاده شده است. پس از تعیین ساختار خوشه‌بندی‌شده شبکه، از یک الگوریتم مسیریابی مبتنی بر نظریه بازی به‌منظور تعیین مسیرهای بهینه جهت ارسال داده به سمت ایستگاه پایه استفاده شده است. عملکرد روش پیشنهادی در محیط شبیه‌سازی مورد ارزیابی قرار گرفته و کارایی آن با الگوریتم‌های پیشین مقایسه شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان علاوه بر کاهش مصرف انرژی، از بروز ترافیک در سطح شبکه جلوگیری نموده و توزیع بار را به‌صورت کارآمدتری انجام داد.

کلیدواژه‌ها: شبکه حسگر بی‌سیم، خوشه‌بندی، مسیریابی، جستجوی فاخته، نظریه بازی

۱- مقدمه

خوشه‌بندی[۱] به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های مناسب به‌منظور دسته‌بندی ارسال و دریافت در شبکه‌های حسگر بی‌سیم[۲] بشمار می‌رود. در یک شبکه حسگر با همبندی[۳] مبتنی بر خوشه‌بندی، گره‌های حسگر مجاور، گروه‌هایی با نام خوشه[۴] را تشکیل داده و هر گره داده‌های خود را از طریق سرخوشه[۵] به سمت گره مقصد[۶] ارسال می‌کنند. برای مسیریابی داده‌ها در این همبندی، سرخوشه‌های نزدیک به گره مقصد علاوه بر ارسال داده‌های اعضای خوشه خود وظیفه ارسال روبه‌جلو داده‌های ارسالی از سرخوشه‌های دورتر از گره مقصد را نیز بر عهده دارند. این امر موجب می‌شود که مصرف انرژی و ازدحام بسته در گره‌های سرخوشه نزدیک به گره مقصد بالا رود. این شرایط باعث وقوع خطا و مختل شدن عملکرد شبکه حسگر خواهد شد.

کاهش اندازه خوشه‌های نزدیک به گره مقصد و افزایش اندازه خوشه‌هایی که در فاصله بیشتری از آن قرار دارند می‌تواند در رفع این مشکل مؤثر باشد. این راهکار خوشه‌بندی نامتقارن[۷] نامیده می‌شود و استفاده از این روش موجب توزیع متوازن بار در سطح شبکه و در نتیجه بهبود پارامترهای مصرف انرژی و کاهش خطا خواهد شد [۱]. اساسی‌ترین مسئله در ساخت و کنترل همبندی‌های مبتنی بر خوشه‌بندی نامتقارن، تعیین تعداد و اندازه خوشه‌ها است. انتخاب مقادیر بهینه برای این پارامترها می‌تواند منجر به شکل‌گیری یک همبندی بهینه و بهبود پارامترهای اساسی شبکه گردد. به‌همین دلیل می‌توان این مسئله را به‌عنوان یک مسئله بهینه‌سازی در نظر گرفت که با استفاده از الگوریتم‌هایی مانند جستجوی فاخته چندهدفه قابل‌حل است. جستجوی فاخته چندهدفه یک الگوریتم بهینه‌سازی سریع و کارآمد به‌منظور حل مسائل مختلف می‌باشد. در این مقاله، از این الگوریتم به‌عنوان راهکاری برای انتخاب گره‌های سرخوشه و تعیین اندازه خوشه‌ها در شبکه حسگر بی‌سیم استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان الگوریتمی برای کنترل همبندی مبتنی بر خوشه‌بندی ناهمگن در شبکه حسگر بی‌سیم ارائه داد.

در صورت خوشه‌بندی بهینه گره‌های شبکه حسگر، مسیریابی کارآمد داده بین گره‌های سرخوشه همچنان به‌صورت یک مسئله باقی است. چراکه انتخاب مسیرهای بهینه برای ارسال

* رایانامه نویسنده مسئول: Mmshirmohammadi@iauh.ac.ir

[1] Clustering
[2] Wireless Sensor Network
[3] Topology
[4] Cluster
[5] Cluster Head
[6] Sink
[7] Unequal Clustering

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.
© نویسندگان
ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

داده به گره مقصد موجب افزایش کارایی شبکه و توزیع متوازن بار در سطح آن خواهد شد [۲]. برای رسیدن به این هدف، در این تحقیق از یک الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان مسیرهای بهینه برای ارسال داده از طریق گره‌های سرخوشه به سمت گره مقصد را جستجو نمود. لازم به ذکر است که هدف اصلی روش پیشنهادی، بهبود روند خوشه‌بندی شبکه با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه می‌باشد؛ اما ازآنجایی‌که کارکرد مناسب یک شبکه خوشه‌بندی‌شده به نحوه مسیریابی داده در آن نیز وابسته است و ارزیابی عملکرد یک الگوریتم خوشه‌بندی بدون مسیریابی داده ممکن نیست؛ لذا مسیریابی داده بخشی الزامی برای ارزیابی الگوریتم خوشه‌بندی خواهد بود.

ادامه این مقاله به‌صورت زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم به‌مرور برخی از تحقیقات مرتبط پرداخته و در بخش سوم روش پیشنهادی ارائه شده است. سپس در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی ارائه شده و در بخش پنجم، پس از نتیجه‌گیری و جمع‌بندی پیشنهادهایی برای ادامه تحقیقات ارائه شده است.

۲- سوابق تحقیق

در [۳] روشی دومرحله‌ای برای خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم ارائه شده است. در این روش از راهکار انتخاب زنجیره‌ای سرخوشه برای ساخت همبندی شبکه استفاده شده و مسیریابی بر اساس کوتاه‌ترین مسیر در شبکه توری سرخوشه‌ها صورت می‌پذیرد. این راهکار انتخاب سرخوشه را تنها بر اساس سوابق تعداد انتخاب گره به‌عنوان سرخوشه انجام داده و نمی‌تواند تعادل بار در شبکه را حفظ نماید.

در [۴] یک روش خوشه‌بندی و مسیریابی برای شبکه حسگر بی‌سیم ارائه شده است که در آن فرآیند انتخاب سرخوشه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و فرآیند مسیریابی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات PSO[1] صورت می‌پذیرد. الگوریتم ژنتیک برای انتخاب سرخوشه‌های بهینه معیارهای فاصله و انرژی را بکار می‌برد و الگوریتم PSO به‌صورت متمرکز در ایستگاه پایه اجرا می‌شود تا مسیرهای با حداقل تأخیر را برای ارسال داده مشخص کند. استفاده از ساختار متمرکز برای مسیریابی داده، بار محاسباتی و سربار ارتباط زیادی را بر شبکه تحمیل نموده و کاربرد آن در شرایط واقعی را دشوار می‌کند.

در [۵] یک الگوریتم خوشه‌بندی و مسیریابی مبتنی بر ترکیب PSO و الگوریتم جستجوی گرانشی GSA[2] ارائه شده است. در این روش تلاش شده است تا همگرایی الگوریتم PSO از طریق ترکیب آن با الگوریتم GSA بهبود یابد. مقایسه نتایج این ترکیب با الگوریتم PSO ساده نشان از بهبود سرعت همگرایی آن دارد؛ اما بااین‌وجود، این روش نیز از یک راهکار متمرکز در ایستگاه پایه برای تعیین مسیرهای بهینه استفاده کرده است.

در [۶] یک پروتکل سلسله‌مراتبی بر پایه روش خوشه‌بندی به‌منظور کاهش مصرف انرژی در شبکه‌های حسگر ارائه شده است. این روش LEACH نام داشته و پارامتر به‌کاررفته برای تصمیم‌گیری در این روش درصد موردنظر سرخوشه‌هاست. حسگرهایی که تصمیم به سرخوشه شدن می‌گیرند، تصمیم خود را منتشر می‌کنند. انتخاب سرخوشه‌ها به‌صورت مکرر اجرا می‌شود تا مصرف انرژی در شبکه متعادل باشد. این روش در مقایسه با روش‌های پس از خود مصرف انرژی را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

روش خوشه‌بندی نامتقارن متوازن انرژی (LEBUCR[3]) در [۷]، سازوکار خوشه‌بندی نامتقارن در ترکیب با مسیریابی چندگامی درون خوشه را اتخاذ می‌کند. از طریق یک روش خوشه‌بندی رقابتی بر اساس زمان، LEBUCR تمام گره‌ها را به خوشه‌های نامتقارن بخش‌بندی می‌کند که در آن سرخوشه‌ها می‌توانند برای ارتباطات درون خوشه جهت جلوگیری از مسئله نقاط پرازدحام انرژی بیشتری نگهداری کنند. در [۸] یک الگوریتم خوشه‌بندی نامتقارن مبتنی بر یک مدل بهینه‌سازی مصرف انرژی با نام LUCA[4] ارائه شده است. در این روش، اندازه هر خوشه با استفاده از یک مدل مبتنی بر فاصله سرخوشه تا ایستگاه پایه مشخص می‌شود. در هر دوی این روش‌ها، سرخوشه بودن هر گره با استفاده از پارامترهایی تصادفی مشخص می‌شود که این خصوصیت، تخلیه ناگهانی انرژی گره‌های شبکه در دورهای پایانی را در پی دارد.

در [۹] یک روش خوشه‌بندی و مسیریابی در شبکه حسگر بی‌سیم با نام iCSHS ارائه شده است که از ترکیب الگوریتم جستجوی فاخته و هارمونی برای دستیابی به این هدف استفاده می‌کند. در این روش، ساختار خوشه‌بندی شبکه به‌صورت کلی و با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته شکل می‌گیرد. بدین‌صورت که حالت‌های مختلف خوشه‌بندی گره‌های شبکه بررسی شده و به ازای هر حالت میزان برازش در خوشه‌بندی جاری محاسبه می‌شود.

۲-۱- الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه

الگوریتم جستجوی فاخته، یک الگوریتم بهینه‌سازی است که علاوه بر همگرایی سریع‌تر نسبت به سایر روش‌های بهینه‌سازی،

[1] Particle Swarm Optimization
[2] Gravitational Search Algorithm
[3] Layered Energy Balanced Unequal Clustering and Routing
[4] Location-based Unequal Clustering Algorithm

نیازمند تعیین پارامترهای متعدد نمی‌باشد. الگوی کلی این الگوریتم، شروع جستجو از یک مجموعه راه‌حل تصادفی و سپس بهبود آن از طریق عملگرهای مختلف می‌باشد. این الگوریتم بر اساس سه قانون زیر عمل می‌کند:

۱. هر فاخته در هر لحظه بر روی یک تخم می‌خوابد و تخم خود را در آشیانه تصادفی انتخاب‌شده می‌اندازد.

۲. بهترین آشیانه ها با بهترین کیفیت تخم ها به چرخه بعدی واگذار می‌شود. به بیانی دیگر، بهترین راه‌حل‌ها در تکرار بعدیِ الگوریتم جستجو حضور خواهند داشت.

۳. تعداد آشیانه های میزبان موجود ثابت است و پرنده میزبان با احتمال $P_a \in (0,1)$ تخمی را پیدا می‌کند که فاخته بر روی آن خوابیده است.

شبه کد الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه به‌صورت زیر می‌باشد [۱۰]:

الگوریتم ۱: جستجوی فاخته چندهدفه

۱- تعریف اهداف برازش الگوریتم به‌صورت $f_1(x), \dots, f_K(x)\ x = (x_1, \dots, x_d)$

۲- تولید جمعیت اولیه شامل n لانه که هرکدام حاوی K تخم می‌باشند.

۳- تا زمانی که $(t < T)$ یا رخ دادن یکی از شرایط توقف، دستورات این گام را تکرار کن:

۳-۱- یک فاخته تصادفی مانند i را توسط الگوریتم پرداز لوی انتخاب کن.

۳-۲- بهینگی فاخته انتخاب‌شده را در جبهه پرتو ارزیابی کن.

۳-۳- یک لانه تصادفی مانند j را از n انتخاب کن.

۳-۴- اگر راه‌حل‌های موجود در j بر موارد موجود در i غالب است آنگاه i را با پاسخ‌های موجود در j جایگزین کن.

۳-۵- نسبت P_a از بدترین لانه‌ها را ترک کرده و آن‌ها را با لانه‌های جدید جایگزین کن.

۳-۶- بهترین پاسخ‌ها/لانه‌ها را نگهداری کن.

۳-۷- جمعیت را مرتب‌سازی کرده و پاسخ‌های بهینه در تکرار جاری را بر اساس جبهه پرتو مشخص کن.

۳-۸- مقدار t را یک واحد افزایش بده.

۴- پایان.

بر اساس شبه کد فوق، الگوریتم جستجو با تولید یک مجموعه راه‌حل تصادفی برای لانه‌ها آغاز می‌شود. سپس بر اساس یک چرخه تکراری ابتدا یک فاخته مانند i به‌صورت تصادفی انتخاب شده و میزان بهینگی پرتو آن محاسبه می‌شود. در گام بعدی، یک لانه (مجموعه راه‌حل) تصادفی دوم مانند j انتخاب شده و بهینگی پرتو آن با لانه i مقایسه می‌شود. درصورتی‌که لانه j غالب بر لانه i باشد، مجموعه راه‌حل‌های لانه j به‌عنوان مجموعه پاسخ بهینه‌تر نسبت به لانه i تعیین شده و مجموعه راه‌حل j با i جایگزین می‌شود. در گام بعدی این الگوریتم، نسبت P_a لانه با برازش بدتر ترک شده و مجموعه راه‌حل‌های جدیدی به‌صورت تصادفی تولید می‌شوند. در پایان هر چرخه، بهترین مجموعه راه‌حل‌های نگهداری می‌شوند. این گام‌ها تا زمانی که تعداد تکرار الگوریتم به مقدار از پیش تعیین شده T برسد تکرار می‌شود [۱۰].

۳- روش پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی یک روش خوشه‌بندی نامتقارن و رقابتی است. مزیت روش پیشنهادی، استفاده از هوش اجتماعی الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه به‌منظور انتخاب بهینه ساختار خوشه‌بندی شبکه با هدف کاهش مصرف انرژی و افزایش توان عملیاتی شبکه می‌باشد. بر این اساس، ابتدا برازش هر گره برای انتخاب به‌عنوان سرخوشه توسط الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته محاسبه می‌شود. پس از انجام این عمل، هر گره میزان احتمال انتخاب خود را به اطلاع همسایگان می‌رساند و سپس هر گره با مقایسه شرایط همسایگان خود با احتمال انتخاب خود سرخوشه بودن خود را تشخیص می‌دهد. پس از انتخاب سرخوشه‌ها، از یک مدل بهینه‌سازی به‌منظور تعیین اندازه هر خوشه استفاده می‌شود. پس از تشکیل خوشه‌ها عمل مسیریابی داده از طریق ساختار تشکیل شده و نظریه بازی انجام می‌شود. با این توضیحات، عملیات صورت گرفته در الگوریتم پیشنهادی را می‌توان به مراحل زیر تقسیم نمود:

- انتخاب سرخوشه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی فاخته چندهدفه
- تعیین اندازه بهینه برای شعاع هر خوشه
- مسیریابی داده در شبکه خوشه‌بندی‌شده مبتنی بر نظریه بازی

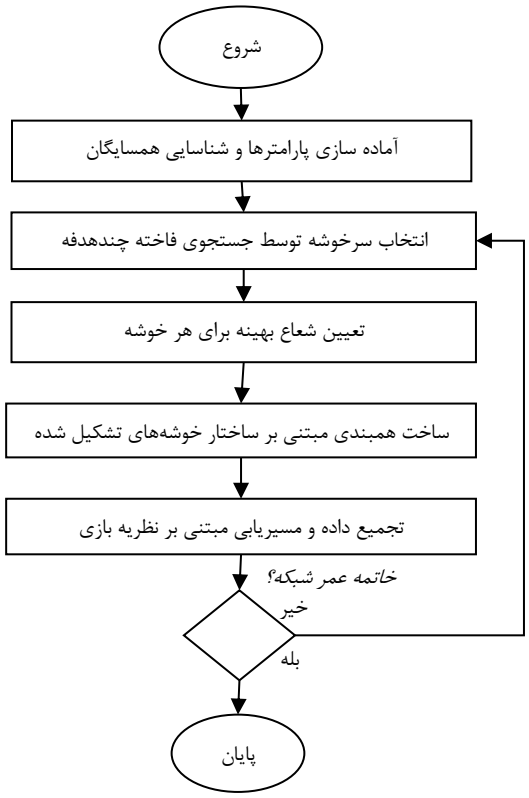
مراحل خوشه‌بندی و مسیریابی در روش پیشنهادی به‌صورت دیاگرام در شکل (۱) نمایش داده شده است.

در ادامه هر یک از این مراحل تشریح خواهد شد.

۳-۱- انتخاب سرخوشه توسط الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه

انتخاب سرخوشه با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه انجام می‌شود. سازوکار جستجوی پاسخ بهینه در این الگوریتم بر اساس روش ارائه شده در [۱۰] می‌باشد. لذا با فرض آشنایی خواننده با این الگوریتم؛ در ادامه اهداف بهینه‌سازی و ساختار بردار پاسخ در این الگوریتم تشریح می‌گردد.

کلیدی‌ترین بخش در یک الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه، اهداف برازش آن می‌باشد. مجموعه اهداف برازش میزان ارزش یک پاسخ را توصیف می‌کند. در نتیجه با استفاده از اهداف برازش می‌توان تعیین کرد که کدام‌یک از گره‌های حسگر شبکه برای انتخاب شدن به‌عنوان سرخوشه مناسب‌تر بوده و کدام پاسخ یافته شده توسط الگوریتم جستجو بهینه است.



شکل (۱). فلوچارت روش پیشنهادی

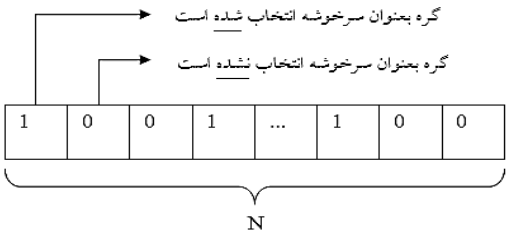
در روش پیشنهادی، الگویتم فاخته چندهدفه بهترین سرخوشه‌ها را با استفاده از سه هدف زیر انتخاب می‌کند:

۱) تعداد سرخوشه‌های انتخاب شده در پاسخ جاری

۲) انرژی سرخوشه‌های انتخاب شده

۳) تعداد همسایگان متصل به سرخوشه‌های انتخاب شده.

بردار مربوط به هر پاسخ در الگوریتم جستجوی فاخته مورداستفاده در روش پیشنهادی در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل (۲). ساختار هر بردار پاسخ در الگوریتم جستجوی فاخته

در شکل (۲)، N مشخص‌کننده تعداد گره‌های حسگر فعال و دارای انرژی در شبکه می‌باشد؛ بنابراین طول هر بردار پاسخ برابر با تعداد گره‌های حسگر فعال شبکه می‌باشد؛ زیرا انتخاب سرخوشه از میان گره‌های دارای انرژی صورت می‌گیرد. مطابق شکل (۲)، به هر حسگر فعال در شبکه یک مکان در بردار پاسخ الگوریتم بهینه‌سازی اختصاص داده می‌شود. هر مکان می‌تواند دارای مقدار ۰ یا ۱ باشد. درصورتی‌که یک مکان دارای مقدار ۰ باشد، آن گره در پاسخ جاری به‌عنوان سرخوشه انتخاب نشده است و در غیر این صورت گره متناظر با مکان جاری به‌عنوان گره سرخوشه انتخاب شده است. به‌منظور محاسبه اهداف برازش در هر پاسخ در روش پیشنهادی توسط الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه، ابتدا فهرست گره‌های انتخاب شده به‌عنوان سرخوشه در مجموعه‌ای مانند $C=\{c_1, ..., c_i\}$ ذخیره می‌شود. سپس اهداف برازش انتخاب جاری با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$F_1 = \frac{|C|}{N} \quad (۱)$$

$$F_2 = \frac{\sum_{i=1}^{|C|} \rho_i}{\sum_{i=1}^{|C|} e_i} \quad (۲)$$

$$F_3 = \frac{N}{\sum_{i=1}^{|C|} k_i} \quad (۳)$$

در روابط فوق، $|C|$ مشخص‌کننده تعداد سرخوشه‌های انتخاب شده و N مشخص‌کننده تعداد گره‌های فعال شبکه است. همچنین اهداف F_1، F_2 و F_3 به ترتیب نشانگر اهداف تعداد سرخوشه، انرژی سرخوشه و تعداد همسایگان سرخوشه‌های انتخاب شده در پاسخ جاری می‌باشد. در روابط فوق، ρ_i انرژی اولیه سرخوشه انتخاب شده iام و e_i انرژی جاری آن گره است. همچنین k_i تعداد همسایگان سرخوشه انتخاب شده iام در پاسخ جاری می‌باشد. دلیل معکوس بودن روابط (۲) و (۳)، سازگار کردن این اهداف با الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی کمینه است. چراکه در یک سازوکار بهینه برای انتخاب سرخوشه، دو هدف انرژی سرخوشه و تعداد همسایگان سرخوشه‌های انتخاب شده باید بیشینه شوند و با معکوس نمودن روابط آن‌ها می‌توان این مسائل جستجوی بیشینه را به مسائل جستجوی کمینه تبدیل نمود.

پس از محاسبه اهداف برازش مربوط به هر گره توسط الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه، عمل جستجو به دنبال بهترین حالت خوشه‌بندی گره‌های فعال شبکه انجام می‌شود. الگوریتم جستجو تا زمانی تکرار می‌شود تعداد تکرارهای الگوریتم به تعداد از پیش تعیین شده T برسد. مقدار پارامتر تعداد تکرار T، به‌صورت تجربی تعیین می‌گردد. بدیهی است که با افزایش مقدار این پارامتر، احتمال تعیین حالات بهینه‌تر برای مسئله خوشه‌بندی شبکه افزایش خواهد یافت؛ اما بااین‌وجود، افزایش

تعداد تکرارهای الگوریتم بهینه‌سازی به قیمت افزایش تأخیر و هزینه محاسباتی خواهد بود. پس از تعیین گره‌های سرخوشه، هر گره میزان احتمال انتخاب خود را به‌صورت نسبت تعداد همسایگان فعال به کل گره‌های شبکه محاسبه نموده و این مقدار را به اطلاع همسایگان می‌رساند و سپس هر گره با مقایسه مقادیر دریافتی از همسایگان خود با احتمال انتخاب خود سرخوشه بودن خود را تشخیص می‌دهد. بدین‌صورت که یک گره در صورتی خود را به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند که مقدار احتمال انتخاب او بیشتر از مقادیر دریافت شده از تمامی همسایگانش باشد. در گام بعدی عمل تعیین اندازه و تشکیل خوشه‌ها انجام خواهد شد که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۳-۲- تعیین اندازه بهینه برای هر خوشه و تشکیل ساختار خوشه‌ها

تعیین اندازه سرخوشه‌ها در روش پیشنهادی بر اساس مدل ارائه شده در [۸] صورت می‌گیرد. یک خوشه در شبکه حسگر را در نظر بگیرید که اندازه آن r و فاصله سرخوشه آن با ایستگاه پایه برابر با D باشد. لازم به ذکر است که اندازه خوشه برحسب تعداد گام همسایگی سرخوشه توصیف می‌شود. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، جایگیری گره‌های حسگر در محیط به‌صورت تصادفی فرض شده و همچنین تراکم گره‌های حسگر در نواحی مختلف محیط به‌صورت تقریباً یکنواخت می‌باشد. درصورتی‌که تراکم شبکه برابر با μ در نظر گرفته شود، بنابراین میانگین تعداد حسگرها در هر خوشه برابر است $\mu\pi r^2$ خواهد بود. در این صورت میانگین فاصله گره‌های حسگر واقع در خوشه تا سرخوشه آن‌ها به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\int_0^{2\pi}\int_0^{r} r^2\, dr\, d\theta \left(\frac{1}{\pi r^2}\right) = \frac{2r}{3} \qquad (۴)$$

به‌منظور پیدا کردن بهترین اندازه مناسب برای یک خوشه باید ابتدا میانگین انرژی مصرفی برای ارسال یک بیت داده از هر حسگر به ایستگاه پایه را محاسبه نمود. این امر مستلزم محاسبه انرژی مصرفی داخل خوشه و انرژی مصرفی برای ارسال از سرخوشه به ایستگاه پایه می‌باشد. با استفاده از رابطه (۲) می‌توان میانگین انرژی مصرفی تمام اعضای خوشه برای ارسال یک بیت داده به سرخوشه خود را به‌صورت زیر بیان نمود:

$$E_{intra} = \frac{\mu\pi r^2 2r}{3} \qquad (۵)$$

برای محاسبه میانگین انرژی مصرفی برای ارسال یک بیت داده از سرخوشه به ایستگاه پایه می‌توان از طریق رابطه زیر عمل نمود:

$$E_{inter} = \frac{D}{r_0} \qquad (۶)$$

و در رابطه فوق، r_0 برد رادیویی گره می‌باشد. اکنون برای محاسبه میانگین انرژی مصرفی کل برای ارسال یک بیت داده می‌توان روابط (۵) و (۶) را با هم جمع کرد. ازآنجایی‌که تعداد حسگرها در هر خوشه برابر با $\mu\pi r^2$ می‌باشد، بنابراین میانگین انرژی مصرفی برای ارسال یک بیت داده از هر گره حسگر به ایستگاه پایه برابر است با:

$$E_{avg} = \frac{E_{intra} + E_{inter}}{\mu\pi r^2} = \frac{1}{r_0}\left(\frac{2r}{3} + \frac{D}{\mu\pi r^2}\right) \qquad (۷)$$

با مشتق گرفتن از رابطه (۷) نسبت به r می‌توان دریافت که مقدار r که E_{avg} را کمینه می‌کند برابر است با:

$$r = \left\lfloor \frac{1}{r_0}\left(\frac{3D}{\mu\pi}\right)^{\frac{1}{3}} \right\rfloor \qquad (۸)$$

بنابراین هر گره سرخوشه با استفاده از رابطه (۸) بهترین اندازه خوشه برای خود را بر اساس فاصله‌اش تا ایستگاه پایه محاسبه می‌کند. در رابطه (۸) که اندازه بهینه خوشه را برحسب تعداد گام مشخص می‌کند، اندازه خوشه (r) با فاصله سرخوشه از ایستگاه پایه (D) رابطه مستقیم دارد.

هر سرخوشه پس از تعیین اندازه خوشه مربوط به خود، پیامی را به همسایگان r گامی خود ارسال کرده تا گره‌های دریافت‌کننده این پیام به عضویت خوشه درآیند. لازم به ذکر است که به‌منظور حل مشکل گره‌های سرگردان و خوشه‌بندی نشده در شبکه، درصورتی‌که گرهی با این وضعیت در شبکه یافت شود، به عضویت نزدیک‌ترین سرخوشه در همسایگی خود درخواهد آمد. پس از تشکیل خوشه‌ها عمل مسیریابی داده در شبکه خوشه‌بندی‌شده انجام می‌شود.

۳-۳- مسیریابی داده در شبکه خوشه‌بندی‌شده

پس از تکمیل خوشه‌ها، عمل مسیریابی داده انجام می‌شود. بدین منظور از یک مدل مبتنی بر نظریه بازی استفاده می‌شود. فرآیند مسیریابی تنها از طریق گره‌های سرخوشه انجام می‌شود. به‌منظور ساده کردن مسئله مسیریابی، ساختار شبکه را به‌صورت یک مدل عرضه و تقاضا در نظر گرفته می‌شود. در این حالت، گره‌های شبکه از دیدگاه مسیر به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- سرخوشه منبع: گره حسگر تولیدکننده بسته داده برای مسیریابی
- سرخوشه‌های میانی: گره‌هایی که می‌توانند در مسیریابی بسته به سمت مقصد مشارکت کنند.
- گره مقصد: ایستگاه پایه که مقصد تمامی بسته‌های داده بوده و فرض می‌شود که از منبع انرژی نامحدودی برخوردار می‌باشد.

مدل عرضه و تقاضای مفروض، گره ایستگاه پایه درصورتی‌که داده جاری را با موفقیت دریافت کند، مقدار پاداش M را به گره‌های مشارکت‌کننده در فرآیند مسیریابی آن بسته پرداخت خواهد نمود. گره منبع نیز به هر گره میانی مانند v_i که در فرآیند مسیریابی مشارکت داشته باشد، پاداش Q_i را پرداخت خواهد نمود. به‌منظور ساده‌سازی محاسبات، فرض می‌شود که مقدار Q_i برای تمامی گره‌های میانی یکسان بوده و برابر با ثابت Q می‌باشد؛ بنابراین هر سرخوشه درصورتی‌که میزان سود مثبتی را ارزیابی کند می‌تواند در استراتژی بازی نقش داشته و در مسیر ارسال داده حضور داشته باشد. این بدان معناست که میزان سود دریافتی گره از ارسال داده، بیش از هزینه‌ای (انرژی و تأخیر) است که برای ارسال آن داده خواهد داشت.

مدل بازی پیشنهادشده برای حل این مسئله را می‌توان را به‌صورت سه‌تایی $F=<P,S,U>$ نمایش داد. در این سه‌تایی، P نشان‌دهنده مجموعه بازیکنان خواهد بود و شامل تمامی سرخوشه‌های فعال در شبکه (غیر از ایستگاه پایه) می‌باشد. همچنین مجموعه $S = \{s_i | i \in P\}$ نشان‌دهنده انتخاب‌ها بازیکنان در استراتژی بازی می‌باشد و $U = \{u_i | i \in P\}$ معرف تابع سودمندی است.

در یک شبکه شامل n سرخوشه (با احتساب منبع و مقصد)، استراتژی بازی برای هر گره سرخوشه (به‌جز گره مقصد که استراتژی آن در مدل بازی نادیده گرفته می‌شود)، به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$S_i = (s_{i1}, s_{i2}, \dots, s_{ii-1}, s_{ii+1}, \dots, s_{in}) \quad (۹)$$

در رابطه فوق، $s_{ij} \in \{0,1\}$ و اگر گره v_j گام بعدی گره v_i در مسیر جاری باشد، آنگاه $s_{ij}=1$ خواهد بود و در غیر این صورت مقدار آن برابر با صفر خواهد بود. با توجه به اینکه هر مسیر فاقد انشعاب بوده و هر گام میانی دارای دقیقاً یک گام قبلی و یک گام بعدی می‌باشد؛ لذا در هر بردار S_i، فقط یکی از عناصر بردار برابر با یک است و مابقی عناصر صفر می‌باشند. همچنین درصورتی‌که استراتژی بازی گره i به‌صورت یک بردار تماماً صفر باشد، آنگاه گره i در مسیر جاری نقشی نخواهد داشت. در این مدل بازی، تابع سودمندی برای هر گره مانند i به‌صورت رابطه زیر توصیف می‌شود:

$$u_i = \gamma_i(B_i - C_{ij}) \quad (۱۰)$$

که در رابطه فوق، γ_i به‌صورت یک ثابت ضریب اثرگذاری تعریف می‌شود. اگر گره i در مسیر جاری واقع شده باشد، آنگاه γ_i برابر با یک و در غیر این صورت برابر با صفر تعیین می‌گردد. در رابطه فوق، B_i نشان‌دهنده سود گره i در مسیر می‌باشد و C_{ij} مشخص‌کننده مقدار هزینه‌ای است که گره i پس از انتخاب استراتژی s_{ij} باید بپردازد و این هزینه بر اساس خصوصیات ارتباطی بین گره i و j محاسبه می‌شود. در رابطه فوق، سود گره i در مسیر با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$B_i = b_i \prod_{v_i}^{v_k} p_i \quad (۱۱)$$

در رابطه فوق، p_i نشان‌دهنده احتمال ارسال روبه‌جلو داده دریافتی توسط گره i می‌باشد. این معیار از طریق محاسبه نسبت تعداد بسته‌های ارسال‌شده قبلی توسط گره i تقسیم بر تعداد بسته‌های دریافت شده توسط او محاسبه می‌شود. همچنین در رابطه فوق ضریب b_i به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$b_i = \begin{cases} M - h.Q & if\ i\ is\ source \\ Q & otherwise \end{cases} \quad (۱۲)$$

به‌منظور محاسبه هزینه C_{ij} در رابطه (۱۰)، از معیارهای انرژی و تأخیر ارتباطی بین دو گره i و j (استراتژی انتخاب شده توسط گره i) استفاده خواهد شد؛ بنابراین تابع هزینه C_{ij} از دو بخش مجزا و مستقل تشکیل شده و هر بخش این تابع به یکی از معیارهای: انرژی و تأخیر ارتباط وابسته است.

الف) انرژی: در فرآیند انتخاب مسیر، میزان انرژی بالاتر گره‌های واقع در مسیر مطلوب خواهد بود؛ به‌بیان‌دیگر، انتخاب مسیری در اولویت قرار خواهد داشت که گره‌های آن از سطح انرژی بالاتری برخوردار باشند؛ زیرا این حالت موجب کاهش احتمال اتمام زودهنگام انرژی گره و بروز اختلال در فرآیند مسیریابی خواهد شد. در این حالت، بخش وابسته به انرژی تابع هزینه به‌صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$C_{E_{ij}} = \frac{E_j \mu_j}{E_{max}} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق، E_j انرژی فعلی گره j و E_{max} انرژی اولیه گره می‌باشد. همچنین در رابطه فوق، درصورتی‌که گره j حداقل انرژی لازم برای فعالیت را داشته باشد ($E_j>E_{min}$)، آنگاه گره j توانایی مشارکت در استراتژی بازی را خواهد داشت و $\mu_j = 1$ تعیین خواهد شد و در غیر این صورت مقدار μ_j برابر با صفر خواهد بود و بدین معناست که انتخاب استراتژی متناظر با گره j مستلزم پرداخت هزینه بالایی مانند اتمام انرژی آن گره خواهد بود.

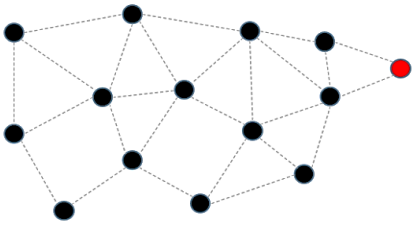
ب) تأخیر: دومین معیار برای ارزیابی ارتباط با یک گره، معیار تأخیر می‌باشد. تأخیر گره i عبارت است از؛ فاصله زمانی بین نقطه اقدام به ارسال داده تا نقطه تحویل موفق بسته و تصدیق تحویل. برای ارسال روبه‌جلو داده از i به j تابع هزینه مبتنی بر تأخیر به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{D_{ij}} = \frac{1}{\left\lceil \frac{D_{i,j} + D_{j.BS}}{\omega} \times \varphi \right\rceil} \quad (۱۴)$$

در این رابطه، $D_{i,j}$ فاصله اقلیدسی بین دو گره i و j بوده و دو پارامتر ω و φ به ترتیب نسبت و ثابت تأخیر هستند. همچنین $D_{j.BS}$ نشان‌دهنده فاصله اقلیدسی بین گره j و ایستگاه پایه می‌باشد (طبق فرض اولیه، هر گره حسگر از موقعیت خود نسبت به ایستگاه پایه اطلاع دارد). در نظر گرفتن این پارامتر تضمین می‌کند که با پیشروی در هر گام مسیر، به ایستگاه پایه نزدیک‌تر خواهیم شد. در این مدل بازی، پس از محاسبه دو بخش مستقل هزینه، تابع هزینه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

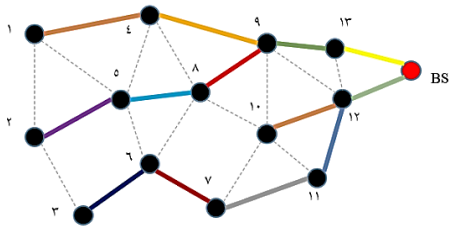
$$C_{ij} = \frac{\alpha}{C_{E_{ij}}} + (1-\alpha)C_{D_{ij}} \qquad (۱۵)$$

به‌منظور وضوح بیشتر نحوه به‌کارگیری مدل بازی ارائه شده در فرآیند مسیریابی شبکه حسگر، به بررسی آن در یک سناریوی فرضی پرداخته می‌شود. یک شبکه حسگر مانند شکل (۳) را در نظر بگیرید. در این شبکه، ارتباطات بین گره‌های سرخوشه همسایه به‌صورت خط‌چین نمایش داده شده است. همچنین ایستگاه پایه به‌صورت یک گره با رنگ قرمز نمایش داده شده است.



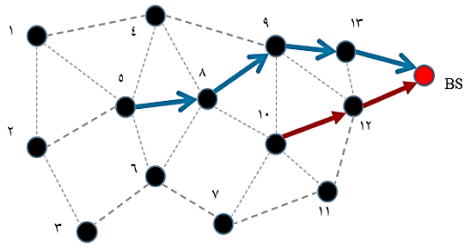
شکل (۳). یک شبکه مفروض و ارتباطات همسایگی بین گره‌های آن

بر اساس مدل بازی تشریح شده در بخش قبل، هر گره سرخوشه (بازیکن) یک استراتژی بازی را مطابق با تابع سودمندی انتخاب می‌کند. استراتژی‌های انتخاب شده توسط گره‌های حسگر و مبتنی بر مدل بازی تشریح شده در شکل (۴) نمایش داده شده است. ازآنجایی‌که هر بازیکن استراتژی خود را مستقل از سایر بازیکنان انتخاب کرده و عمل انتخاب استراتژی به‌صورت هم‌زمان توسط بازیکنان انجام می‌شود؛ در این شکل، استراتژی‌های انتخاب شده هر بازیکن با رنگی متمایز نمایش داده شده است.



شکل (۴). استراتژی‌های انتخاب شده توسط سرخوشه‌ها در شبکه مفروض شکل (۳)

به‌عنوان نمونه در شکل (۴)، گره حسگر ۸ می‌تواند یکی از پنج حسگر همسایه {4,5,6,9,10} را انتخاب نماید که با استفاده از تابع سودمندی خود، استراتژی متناظر با گره حسگر ۹ را به‌عنوان گام بعدی خود انتخاب کرده است. مسیریابی داده با الحاق استراتژی‌های انتخاب شده توسط هر حسگر ممکن خواهد بود. به‌عنوان مثال، مسیرهای ارسال داده برای دو گره حسگر ۵ و ۱۰ به سمت ایستگاه پایه به‌صورت شکل (۵) خواهد بود.



شکل (۵). مسیرهای انتخاب شده برای ارسال داده از منابع ۵ و ۱۰ به ایستگاه پایه

۳-۴- بررسی تعادل نش در مدل بازی

برای بررسی تعادل نش در مدل بازی تشریح شده، فرض می‌شود که این الگوریتم، یک مسیر مانند $O = \langle v_1, \dots, v_i, v_j, \dots, v_k, \dots, v_n \rangle$ بین مبدأ v_1 و مقصد v_n را کشف نموده است. بر اساس برهان خلف، ابتدا فرض می‌شود که این مسیر تعادل نش ندارد و یکی از گره‌های مسیر مانند v_i، قصد دارد گام بعدی خود را تغییر دهد. بر اساس مطالب تشریح شده در بخش قبل، گره‌هایی که در استراتژی‌های قابل انتخاب خود هیچ سود مثبتی را ارزیابی نکنند، یک استراتژی صفر خواهند داشت و سایر گره‌ها نیز تمایلی برای انتخاب آن‌ها به‌عنوان گام بعدی خود در مسیر نخواهند داشت؛ بنابراین، گره v_i انگیزه‌ای برای انتخاب آن‌ها به‌عنوان گام بعدی نخواهد داشت. بدین ترتیب، این گره فقط می‌تواند گام بعدی خود را با گره همسایه‌ای که در مسیر قرار دارد تغییر دهد (استراتژی‌هایی که قبلاً انتخاب شده است). این تغییر اتفاق نخواهد افتاد، زیرا به‌عنوان مثال اگر v_i بخواهد گام بعدی خود را از v_j به v_k تغییر دهد، این بدین معناست که مسیر جدیدی مانند $O' = \langle v_1, \dots, v_i, v_k, \dots, v_n \rangle$ نیز وجود دارد که دارای سودمندی بیشتری برای همه گره‌های موجود در مسیر است چراکه در این مسیر تعداد گام‌ها کاهش می‌یابد (گام‌های میانی بین v_j تا v_k حذف شده است). از طرفی مشخص است که هیچ تغییری در مقدار هزینه ارتباط بین همه گره‌های موجود در مسیر ایجاد نشده و سودمندی همه گره‌ها مثبت است. بنابراین، به دلیل کاهش تعداد گام‌های دارای سودمندی مثبت؛ سودمندی کل در مسیر O' همواره از O کمتر خواهد بود. ازاین‌رو، می‌توان نتیجه گرفت که مسیر کشف‌شده توسط مدل بازی پیشنهادی، تعادل نش دارد.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

محیط شبیه‌ساز شبکه برای تجزیه‌وتحلیل عملکرد الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. همان‌طور که در بخش سوم شرح داده شد، مدل

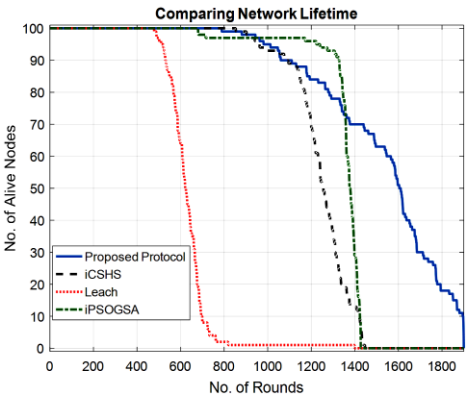
مورداستفاده برای محاسبه میزان انرژی مصرفی در ارتباطات بین گره‌ها، بر اساس مدل ارائه شده در [۱۱] می‌باشد. در این آزمایش یک شبکه حسگر در محیطی محدود در نظر گرفته می‌شود که گره‌های حسگر در آن به‌صورت تصادفی و یکنواخت توزیع شده‌اند. مهم‌ترین پارامترهای مورداستفاده در این سناریو در جدول (۱) نمایش داده شده است.

در این آزمایش، ابتدا به بررسی طول عمر شبکه حسگر با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی پیشنهادی پرداخته و نتایج به‌دست‌آمده با الگوریتم‌های iPSOGSA در [۵]، iCSHS در [۹] و روش Leach در [۶] مقایسه می‌شود.

جدول (۱). پارامترهای شبیه‌سازی

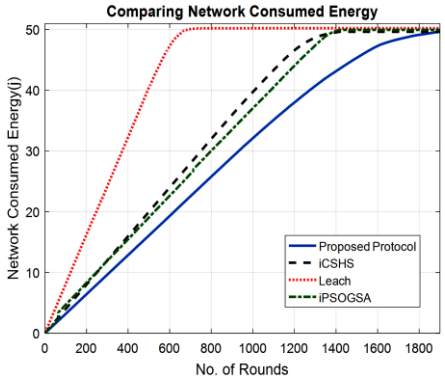
پارامتر	مقدار
ابعاد محیط	۱۰۰× ۱۰۰ m
تعداد گره	۱۰۰
موقعیت گره مقصد	مرکز محیط (۵۰،۵۰)
انرژی اولیه هر گره	۰/۵ J
برد رادیویی برای یک گام ارتباطی	۱۵ m
اندازه بسته داده	۶۴۰۰ bits
نرخ تجمیع داده	۱۰٪

طول عمر شبکه، یکی از معیارهای اصلی برای بررسی کارایی الگوریتم‌های خوشه‌بندی محسوب می‌شود. شکل (۶) تعداد گره‌های زنده در شبکه را به ازای تعداد دورهای مختلف در روش پیشنهادی و الگوریتم‌های مقایسه شده را نمایش می‌دهد.



شکل (۶). تعداد گره‌های زنده در شبکه در دورهای مختلف

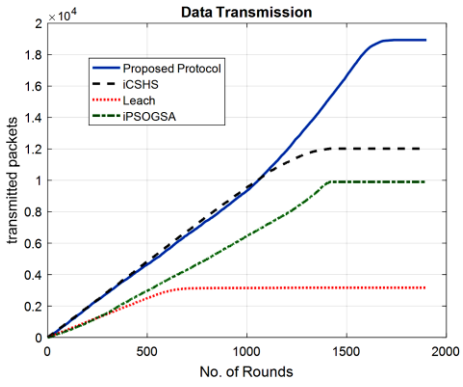
همان‌طور که در شکل (۶) نمایش داده شده است، طول عمر شبکه در روش پیشنهادی حدود ۵۰۰ دور بیشتر از طول عمر شبکه در روش‌های iPSOGSA و iCSHS؛ و حدود ۱۱۰۰ دور بیشتر از روش Leach می‌باشد. دلیل این امر را می‌توان به عملکرد بهتر روش پیشنهادی برای تعیین اندازه خوشه‌ها و مسیریابی داده نسبت داد. این نتایج کارایی الگوریتم پیشنهادی در مصرف انرژی را نمایش می‌دهد و مشخص می‌کند که خوشه‌بندی با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه و خاصیت اجتماعی گره‌ها در روش پیشنهادی می‌تواند بار شبکه را به‌صورت متوازن توزیع کرده تا از اتمام زودرس انرژی یک گره جلوگیری به عمل آید. شکل (۷) مجموع انرژی مصرف‌شده در هر دور توسط تمامی گره‌ها را نمایش می‌دهد.



شکل (۷). مجموع انرژی مصرف‌شده در هر دور توسط تمامی گره‌ها

همان‌طور که نتایج شبیه‌سازی در شکل (۷) نمایش می‌دهد، میزان مصرف انرژی در روش پیشنهادی به‌وضوح از روش‌های iPSOGSA، iCSHS و Leach کمتر است. همین امر موجب کارایی بیشتر شبکه و طول عمر بیشتر آن در طول شبیه‌سازی خواهد شد. روش پیشنهادی، اندازه هر خوشه را با هدف دستیابی به کمترین میزان مصرف انرژی تعیین می‌کند و گره‌هایی را با هدف انرژی کارآمد کردن شبکه به‌عنوان سرخوشه انتخاب می‌کند. همچنین الگوریتم مسیریابی پیشنهادی مبتنی بر نظریه بازی موجب توزیع بار در شبکه شده و از تحمیل بار زیاد بر گره‌های اطراف ایستگاه پایه جلوگیری به عمل خواهد آورد. بدین‌صورت که در ساختار خوشه‌بندی تشکیل شده، اندازه خوشه‌های نزدیک به گره مقصد کوچک تعیین می‌شود و در نتیجه از افزایش مصرف انرژی برای ارسال روبه‌جلو داده و همچنین تحمیل بار ترافیکی زیاد بر گره‌های نزدیک به ایستگاه پایه جلوگیری خواهد شد.

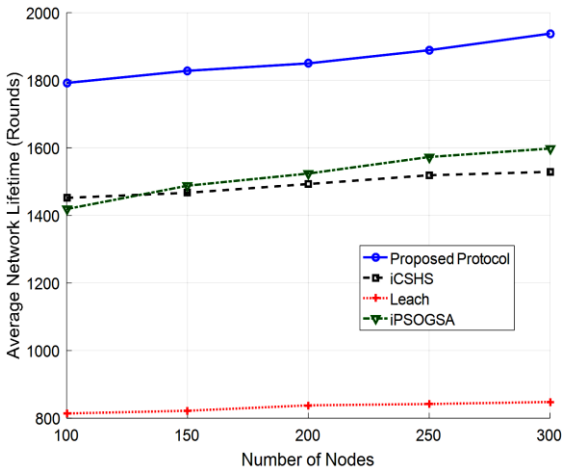
شکل (۸) تعداد بسته‌های ردوبدل شده موفق در شبکه به ازای دورهای مختلف در شبیه‌سازی را نمایش می‌دهد.



شکل (۸). تعداد بسته‌های ردوبدل شده موفق در دورهای مختلف

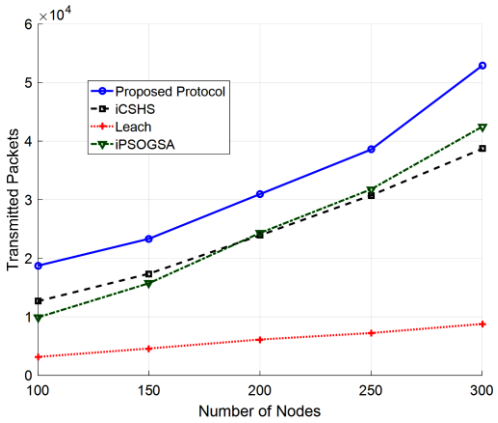
در شکل (۸)، نتایج ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی ازنظر تعداد بسته ارسالی با الگوریتم‌های iPSOGSA، iCSHS و Leach مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل (۸) نمایش داده شده است، روش پیشنهادی می‌تواند بیش از یک و نیم برابر روش iCSHS و نزدیک به ۱/۹ برابر بیشتر از روش iPSOGSA بسته‌های داده را بین گره‌های شبکه انتقال دهد؛ زیرا با تداوم استفاده از شبکه، گره‌های حسگر در روش‌های iPSOGSA و iCSHS انرژی خود را از دست می‌دهند اما در روش پیشنهادی، همچنان تعداد گره کافی برای ارسال داده و مسیریابی بسته‌ها در دسترس می‌باشد. این اختلاف در مقایسه با روش Leach بیشتر بوده و روش پیشنهادی قادر به ردوبدل ۵/۷ برابری بسته‌های داده بین گره‌های شبکه در مقایسه با روش Leach می‌باشد. این کارایی در ارسال، نتیجه استفاده از ساختار خوشه‌بندی نامتقارن در روش پیشنهادی است. این الگوریتم علاوه بر کاهش مصرف انرژی در حین مسیریابی داده، با توزیع مناسب بار در سطح شبکه می‌تواند تعداد بسته‌های داده بیشتری را بین گره‌های شبکه انتقال دهد.

در ادامه این بخش به بررسی تغییرات تعداد گره‌های شبکه بر عملکرد روش پیشنهادی پرداخته خواهد شد. در این آزمایشات نیز، کارایی روش پیشنهادی با روش‌های iPSOGSA [۵]، iCSHS [۹] و Leach [۶] مقایسه شده است. در این آزمایش، تعداد گره‌های حسگر شبکه در بازه ۱۰۰ تا ۳۰۰ گره تغییر داده شده و معیارهای طول عمر شبکه و مجموع تعداد بسته‌های ردوبدل شده مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که سایر پارامترهای شبیه‌سازی بر اساس جدول (۱) تعیین شده است. در شکل (۹)، طول عمر کلی شبکه به ازای تغییرات تعداد گره‌های حسگر نمایش داده شده است.



شکل (۹). طول عمر شبکه به ازای تغییرات تعداد گره حسگر

همچنین شکل (۱۰)، تعداد بسته‌های ردوبدل شده به ازای این تغییرات را به تصویر می‌کشد.



شکل (۱۰). بسته‌های ردوبدل شده به ازای تغییرات تعداد گره حسگر

همان‌طور که در شکل (۹) نمایش داده شده است؛ افزایش تعداد گره‌های حسگر، افزایش طول عمر شبکه را در پی خواهد داشت؛ زیرا افزایش تعداد حسگرها به معنای افزایش تعداد منابع انرژی است که می‌توانند در فرآیند مسیریابی مشارکت کنند و شبکه را به مدت‌زمان بیشتری فعال نگاه دارند؛ اما این افزایش طول عمر در صورتی رخ خواهد داد که پروتکل خوشه‌بندی و مسیریابی قادر به استفاده بهینه از منابع انرژی حسگرها باشد. این شرایط برای روش پیشنهادی به‌خوبی در شکل (۹) قابل‌مشاهده است و روش پیشنهادی با خوشه‌بندی نامتقارن گره‌های شبکه و مسیریابی کارآمد داده بین گره‌های سرخوشه، از اتلاف انرژی گره‌های حسگر جلوگیری نموده و افزایش بیشتر طول عمر شبکه را در پی دارد. با افزایش طول عمر شبکه توسط روش پیشنهادی، طبیعی است که می‌توان تعداد بسته‌های داده بیشتری را به‌صورت موفق بین گره‌های حسگر مبادله نمود. این شرایط در شکل (۱۰) به‌خوبی قابل‌مشاهده است. این نتایج تأیید می‌کند که روش پیشنهادی هم در خوشه‌بندی صحیح گره‌ها و هم در مسیریابی کارآمد داده به‌خوبی عمل می‌کند. بر اساس نتایج حاصل، روش پیشنهادی می‌تواند طول عمر شبکه را نسبت به روش iCSHS به میزان ۲۵/۵۶ درصد و نسبت به روش LEACH به میزان ۱۲۷/۵ درصد افزایش دهد. از طرفی روش پیشنهادی می‌تواند به‌صورت میانگین تعداد بسته‌های ردوبدل شده در شبکه را نسبت به روش iCSHS به میزان ۳۰/۴۳ درصد و نسبت به روش LEACH به میزان ۵۱۸/۱۵ درصد افزایش دهد. از طرفی، پیچیدگی محاسباتی در روش پیشنهادی و روش‌های iPSOGSA و iCSHS برابر با $O(n \times \log n)$ می‌باشد که از پیچیدگی محاسباتی عملگر مرتب‌سازی جمعیت ناشی می‌شود و در آن n مشخص‌کننده تعداد گره‌های فعال شبکه می‌باشد. این پیچیدگی در روش LEACH برابر با $O(n)$ می‌باشد. بااین‌وجود، اگرچه روش LEACH دارای پیچیدگی محاسباتی کمتری نسبت به روش پیشنهادی می‌باشد؛ اما کارایی روش پیشنهادی در

خوشه‌بندی و مسیریابی شبکه حسگر بی‌سیم به‌مراتب بیشتر از روش LEACH بوده و این امر موجب می‌شود که بتوان این اختلاف در پیچیدگی محاسباتی را نادیده گرفت.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک الگوریتم خوشه‌بندی و مسیریابی نامتقارن برای توزیع متوازن بار در شبکه حسگر بی‌سیم پیشنهاد گردید. یکی از مزایای روش پیشنهادی، انتخاب گره‌های سرخوشه با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه برای به حداقل رساندن مصرف انرژی شبکه است. تعیین سرخوشه با الگوریتم جستجوی فاخته چندهدفه انجام می‌شود. در روش پیشنهادی، شعاع هر خوشه نیز با استفاده از یک مدل بهینه‌سازی تعیین می‌شود. یک الگوریتم مبتنی بر نظریه بازی نیز برای مسیریابی داده‌ها بین سرخوشه‌ها در شبکه استفاده می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، روش پیشنهادی یک الگوریتم خوشه‌بندی کارآمد برای کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر شبکه است. الگوریتم مسیریابی مورداستفاده در روش پیشنهادی می‌تواند سرعت ارسال بسته را با توزیع بار مناسب و انتخاب مسیر قابل‌اطمینان و انرژی بیشتر نسبت به روش‌های قبلی بهبود بخشد.

استفاده از سیستم استنتاج فازی به‌منظور تعیین شعاع هر خوشه می‌تواند موجب افزایش انعطاف‌پذیری الگوریتم خوشه‌بندی نامتقارن گردد؛ لذا پیشنهاد می‌شود که استفاده از این سیستم در کارهای آتی موردمطالعه قرار گیرد.

۶- مراجع

[1] W.Dargie, & C. Poellabauer, "Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice," John Wiley & Sons Press, 2010.

[2] D.Kandris, C. Nakas, D. Vomvas, & G. Koulouras, "Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey," Applied System Innovation, Vol. 3, pp. 14-28, 2020.

[3] U.M. Durairaj, & S. Selvaraj, "Two-level clustering and routing algorithms to prolong the lifetime of wind farm-based WSN," IEEE Sensors Journal, Vol. 21, pp. 857-867, 2020.

[4] V. Anand, & S. Pandey, "New approach of GA–PSO-based clustering and routing in wireless sensor networks," International Journal of Communication Systems, Vol. 33(16), pp. 45-71, 2020.

[5] T. Bhowmik, & I. Banerjee, "An Improved PSOGSA for Clustering and Routing in WSNs," Wireless Personal Communications, Vol. 117, pp. 431-459, 2021.

[6] W.R. Heinzelman, A. Chandrakasan, & H. Balakrishnan, "Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks," In Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences on IEEE, pp. 1-10, 2000.

[7] A. Sharma, & K. Verma, "Layered Energy Balanced Unequal Clustering and Routing (LEBUCR) Protocol for Wireless Sensor Networks," Adhoc & Sensor Wireless Networks, Vol. 46, pp. 1-17, 2020.

[8] S. Lee, H. Choe, B. Park, Y. Song, & C. Kim, "LUCA: An energy-efficient unequal clustering algorithm using location information for wireless sensor networks," Wireless Personal Communications, Vol. 56, pp. 715-731, 2011.

[9] G. Gupta, & S. Jha. "Integrated clustering and routing protocol for wireless sensor networks using Cuckoo and Harmony Search based metaheuristic techniques," Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 68, pp. 101-109, 2018.

[10] A. Kaveh, & T. Bakhshpoori, "An efficient multi-objective cuckoo search algorithm for design optimization," Advances in computational design, Vol. 1, pp. 87-103, 2016.

[11] W. Wang, D. Wang, & Y. Jiang, "Energy efficient distributed compressed data gathering for sensor networks," Ad Hoc Networks, Vol. 58, pp. 112-117, 2017.